

台灣鄰近海底冷泉與泥火山：能源與生物寶藏

台灣大學海洋研究所 鄭婉言 林曉武 陳麗雯
 台灣大學地質系 楊燦堯
 中央研究院 戚務正

一、前言

地球生物最茂盛區域多集中在具有充足陽光與水的環境，深洋水深 200 公尺以下之區域就因缺乏陽光、綠色植物無法生長，生物就開始快速變得稀少，只有具有浮游遷移的生物尚能追逐有機顆粒物體而生存的動物可逐食物而生，故而生物種類與豐度隨著水深增加而快速的減少，數百至數千公尺深的海底則就如陸地上沙漠般，幾乎沒有大型生物之存在，這種因陽光而串連之生物群，定義為 Photosynthesis community (光合生物群)。

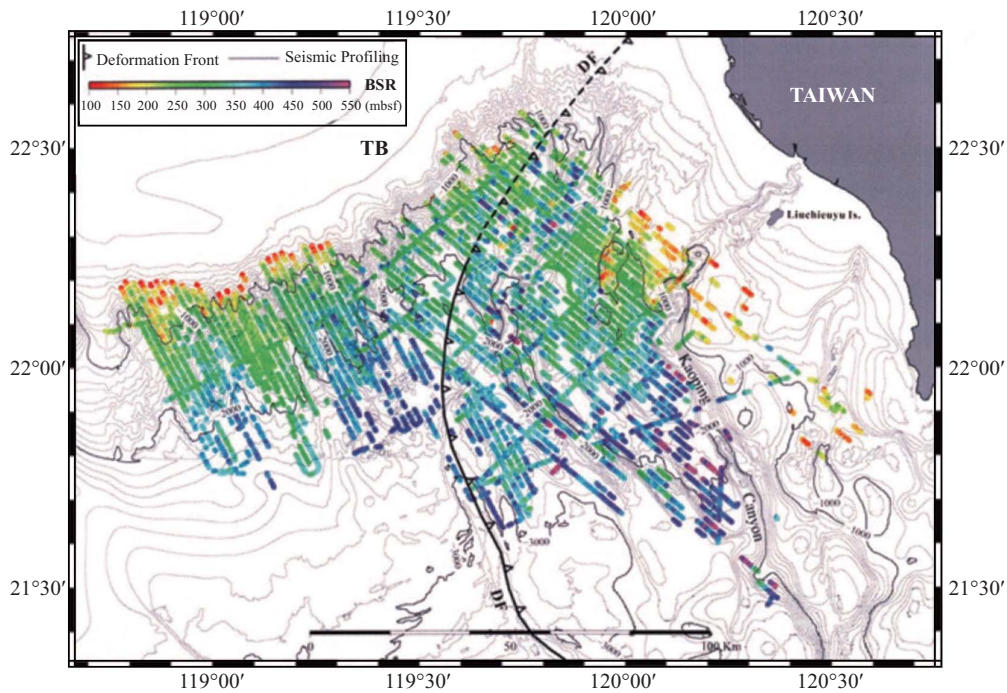
地球上尚有另一種生命群體，定義為 Chemosynthesis community (化能合成生物群)，在缺氧環境下，還原性硫化氫(H₂S)可被微生物氧化，氧化過程中，所釋放的能量可被微生物使用，視硫化氫供應量而決定微生物群體量。微生物也可以與不同型體生物共生，或存在於大型生物之腸壁內或消化器官內而形成共生體。在深海環境中若硫化氫供應量大就可形成大範圍與群聚聚落之生物群聚。深海中常出現此種生態之環境為中洋脊(Mid-ocean Ridge)鄰近之火山熱液噴出口(hydrothermal vents)附近；但冷泉(Cold seep)亦可出現類似的生物族群。

冷泉環境與熱泉環境最大的差別在於硫化氫的來源與熱流，熱泉通常與海底火山相當接近，故溫度可高過 300~400°C，相反的，冷泉環境通常位於低溫沉積環境，故溫度幾乎與當地水溫相同。相同的地方在於二者都處在深海中水壓相當大的環境，且其周圍環境通常缺乏光合作用來源的有機物質(即食物來源)。熱泉硫化氫源自於高溫地殼下還原作用，而冷泉硫化氫之來源則源自於甲烷之無氧氧化作用(Anoxic Methane Oxidation)。

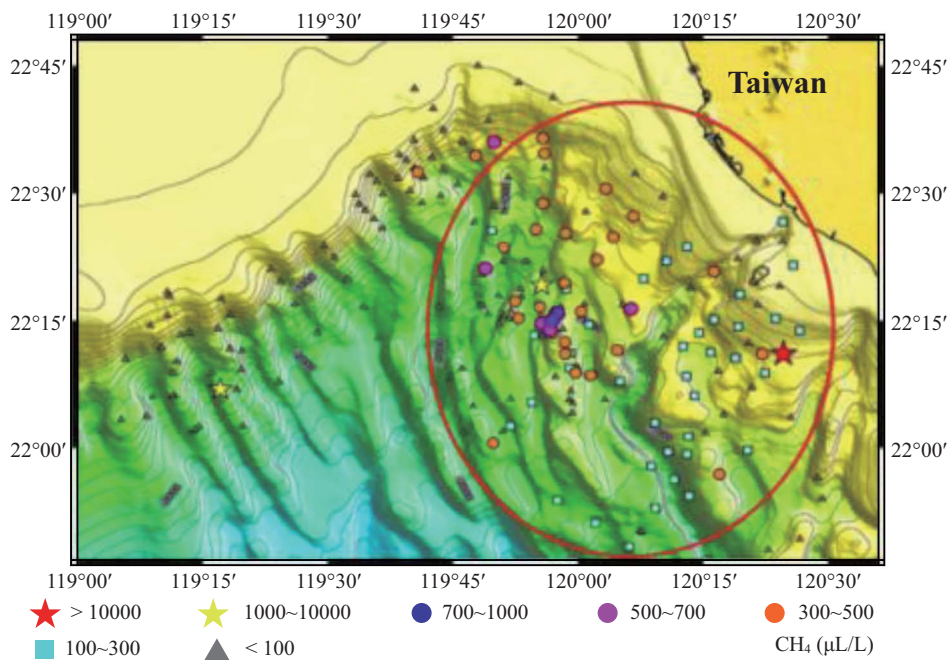
天然氣水合物(gas hydrate)，外觀為冰霜狀的白色固體結晶，主要為天然氣及水在低溫高壓下所形成的固態化合物。在自然環境中所發現的天然氣水合物，每一立方公尺的天然氣水合物，溶解後可釋放 164 立方公尺的氣體與 0.8 立方公尺的水，其包含的氣體中，甲烷氣占 99% 以上，因此又稱甲烷水合物(methane hydrate)。天然氣水合物可以直接點火燃燒，形成冰火共存燃燒的特殊情形，因此也被稱為可燃冰。目前，天然氣水合物已被證實廣泛賦存於大陸邊緣海域及極區的永凍層地層中，蘊藏量預估約為 20×10^{15} 立方公尺，其中所含的有機碳總量相當於全球已知煤、石油和天然氣蘊藏量的 2 倍之多，被喻為是未來重要的新興能源[1]。台灣西南海域亦儲存有大量天然氣水合物(圖一(a), (b)) [2-4]，經濟部地調所估計以台灣目前之天然氣使用量，可開採之天然氣水合物約可供台灣使用約 50 年。

天然氣水合物是甲烷、乙烷等氣體分子在高壓低溫下形成之固體，其氣體來源有生物源與熱裂解兩種。生物源氣體是碎屑性有機物或生物遺骸在沉積物埋藏經由發酵作用產生。海洋碎屑有機物多富集在細顆粒沉積物內，故發酵作用產生之甲烷集中在細顆粒沉積物內，且只能藉由分子擴散作用進行遷移，但若地層內有裂隙或斷層，則氣體易從此種管道進行遷移。熱裂解來源則因氣體產生主要在高溫狀況生產，其氣體產生速率快且易遷移至儲氣層內，更因在較高溫度下，更可產生熱裂解油。

氣體形成、搬運、儲積與生地化作用可在不同條件溫壓狀況下進行。為確實了解天然氣水合物生地化與物種搬運機制，台德合作計畫藉由與德國 GEOMAR 與 MARUM 等單位進行共同研究，期能藉此二單位所擁有的三維震測等先進海洋探測儀器來探討西南海域天然氣水合物重要



(a)



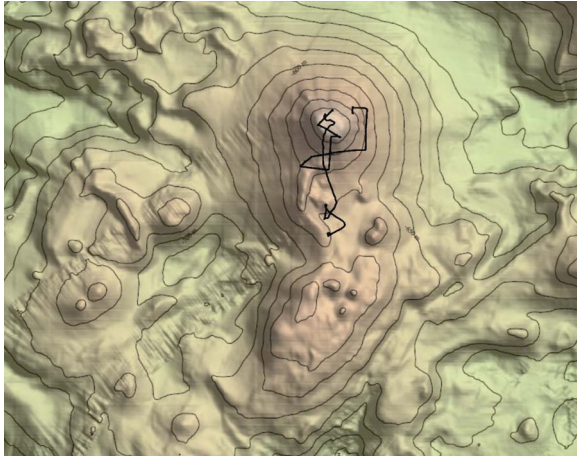
(b)

圖一 (a)西南海域 BSR 分佈圖[2]，利用高頻聲波探測海底天然氣水合物之分布，高密度分佈之 BSR 顯示台灣西南海域有大量之天然氣水合物。(b)西南海域測站岩心表層之甲烷濃度分佈圖[4]，顯示台灣西南海域有大量之天然氣水合物，部分測站在表層沈積物內即有高量甲烷。

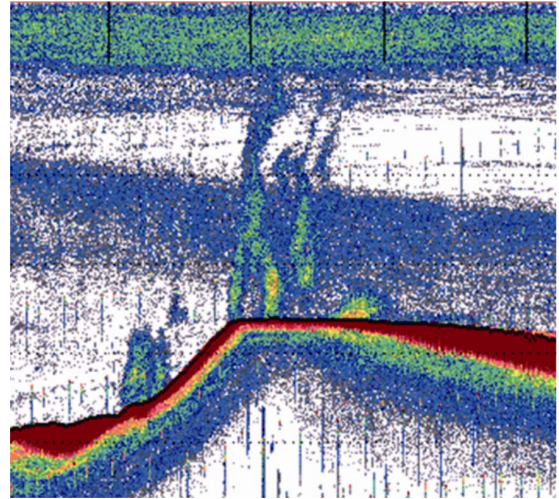
區域、儲積、遷移與生地化反應。本篇文章將報告恆春泥火山群(HengChun Mud Volcano group)與四方圈合海脊(4WC Ridge)海脊氣體冒出區之生地化特徵反應與移動儲積。

二、研究方法

本研究使用海洋研究船德國太陽號(r/v Sonne)，與台灣海研五號(OR5)，與海研一號



圖二 Multibeam 精密水深資料顯示海底泥火山之錐狀體，黑色粗線為 towcam 研究測線



圖三 測深儀觀測到的冒氣現象，已直接冒氣至水面上

(OR1)。本研究使用 R/V Sonne (2013)與 R/V OR5 (2014)進行高解析度之三維震測，使用儀器為 3D P-cable 震測系統儀器；水深地形使用多頻道測深儀 Kongsberg EM120 (Sonne) 與 ATLAS Hydrosweep DS (OR5)；單頻測深儀 SIMRAD EK60 (OR1)；深海底拖式攝影機 WHOI Towcam with Nikon D7000 in pressure housing；活塞沉積物岩心採樣器。

三、研究結果與討論

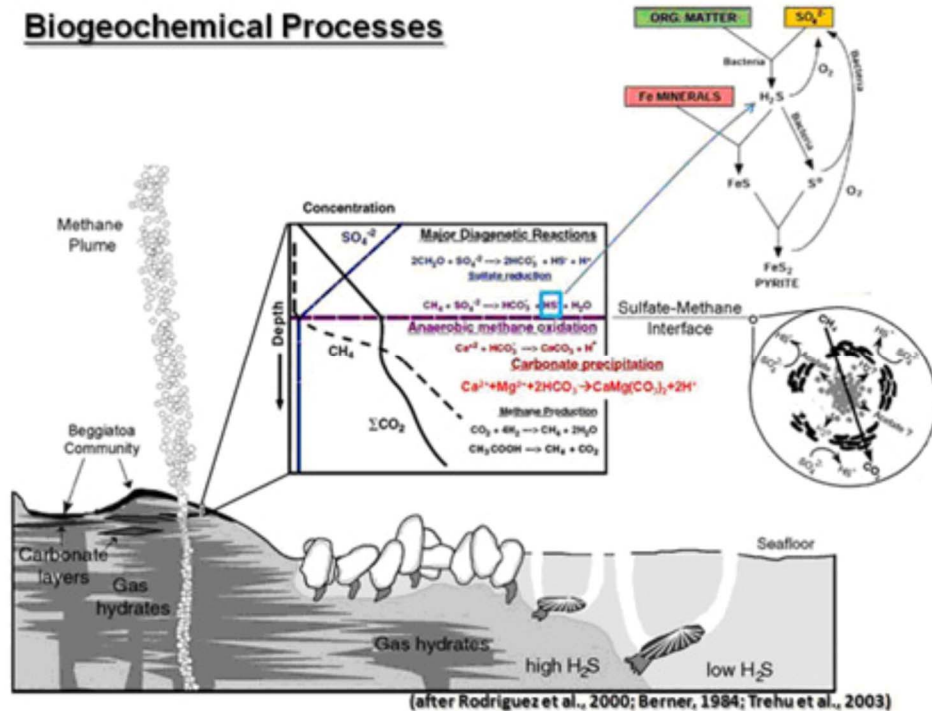
海底沉積物其上覆蓋海水，故而取得正確海底地形圖是正確取得深海沉積物樣品之最重要步驟。德國研究船 r/v Sonne 號與台灣海洋研究船 r/v OR5 都具有高精密多音束海底測深儀^[註]。

圖二為恆春泥火山群，其中共有 12 座泥火山火山錐。本研究針對其中主峰進行多次底拖攝影、水深掃描、3D 震測與岩心採樣。高精密多頻測深儀可獲取水深精密至約 10 米之數據，此種數據有別於一般單頻測深儀提供 >50-100 m 之解析度，對於確實判斷天然氣水合物出露、噴氣口或其它特殊地形則具有絕大之幫助。藉由此種高精密水深，對於貼近海床獲取高精密攝影取得約幾公分精密度之海床工作有極大之助益。本研究在此研究區域內也執行水層氣體搜尋，海床上若有天然氣噴發，此種噴發氣體會改變海水密

度，故藉由海水密度之改變，改變聲波傳輸速度，單頻測深儀即可顯示氣體在海床噴發位置。此種氣體噴發在測深儀上顯示出像火焰般之圖像回波，故稱之為類火焰 (flare，圖三)。研究區域類火焰之出現有二大特徵：1.類火焰數目，2.類火焰高度。本研究在此區域 10 km²，發現 30~50 個類火焰，顯示海床上有大量甲烷等氣體正大量向海床上水體噴發，如此多個類火焰出現，顯示海床下可能有大體積氣體儲庫，亦顯示其若溫壓條件適合下可能有天然氣水合物富集，其氣體儲庫體積則尚在分析研究中。本研究另一重要發現是類火焰可噴發且經過上層水體而至海表，此種噴發現象表示甲烷等溫室氣體已可傳輸至大氣。通常海床上甲烷可被 AOM 作用快速消耗殆盡，故一般冷泉甲烷氣體冒出不會導致甲烷逸出至大氣而致溫室氣體效應擴大[5]。但本研究區域則顯示甲烷等溫室氣體可輸出至大氣，但其確實數值與影響則有待繼續研究評估，更需要有 ROV 才可能進行。

甲烷從天然氣水合物解離或從深部地層中逸出至海床表面，有幾個相關重要的生地化反應 (圖四) (1) AOM 反應，在甲烷/硫酸根介面產生氧化作用[6]，其中能量提供給微生物生長使用，(2)產生之硫化氫部分會與溶解鐵反應產生硫

^[註] 海研五號已於 2014 年十月觸礁深沉海底，也使得國內損失唯一具有深海高精密多頻測深儀之研究能力。



圖四 冷泉生態系統與反應機制

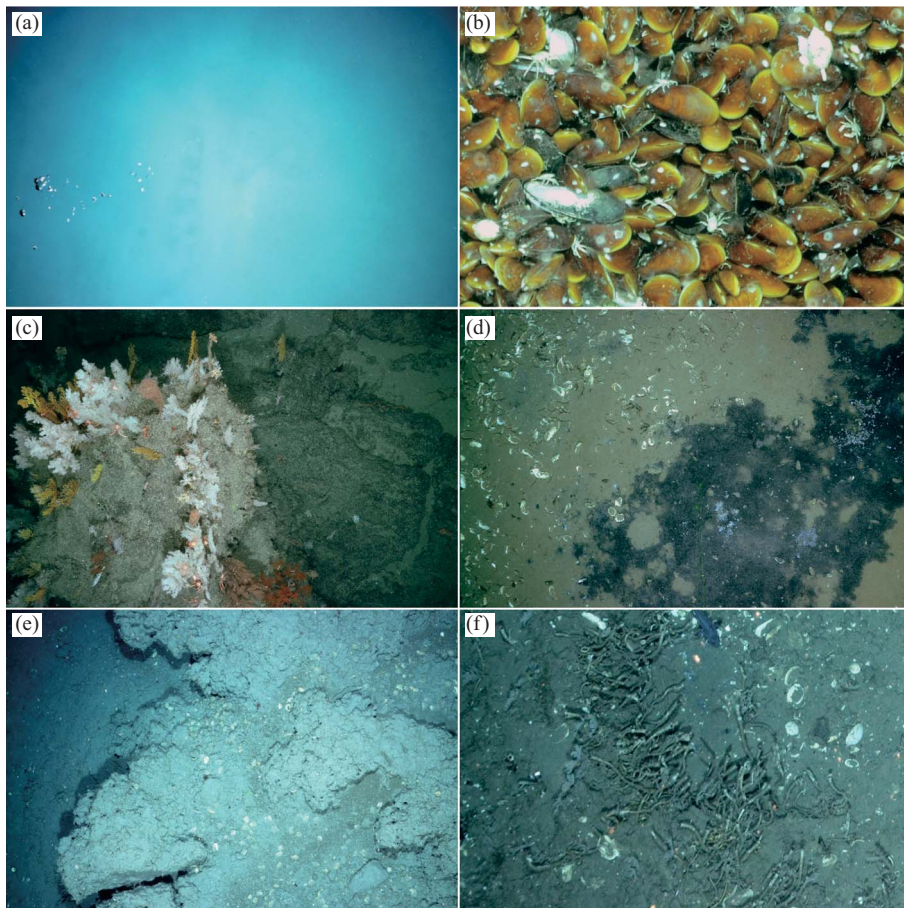
化礦物[7]；(3)產生之碳酸氫根會與鈣反應產生碳酸鈣礦物。各系列性反應可支持大量微生物菌種生長，氣體溢出量若充裕，會造成沈積物表面形成菌叢(bacterial mat)或支持不同種類之底棲生物如 mussel 或 clam。(4)若氣體溢出時程頗長且持續進行 AOM 反應，亦可在海床形成大範圍碳酸鈣岩體。

本研究區域內經由底拖攝影可證實上述各種物理作用與生地化反應皆可在本研究區域內發現。圖五(a)顯示台灣西南海外海研究區域類有大量氣體溢出離開海水/沈積物界面且以氣泡形式冒出海床。圖五(b)甲烷逸出海床後可滋養微生物，微生物可與化能合成生物群，如貽貝(mussel) (或其他種類) 共生造成當地之化能合成生物豐度大增。圖五(b)中有貽貝(mussel)、螺(gastropod)、鎧甲蝦(galatheid crab)等，其中以 mussel 豐度最高，可達 600 隻/m²/層，且深度上可能有數層之厚。此種高密度化能合成生物群之出現，不僅顯示有大量甲烷等氣體溢出，更且支持非常高密度生物生長。圖五(c)與圖五(e)顯出有大體積之自生碳酸鈣形成，圖五(c)有不同種類與顏色之深海軟珊瑚附著在碳酸鈣岩體上，圖五(e)則以死亡之雙枚貝殼體固結形成，圖五(d)

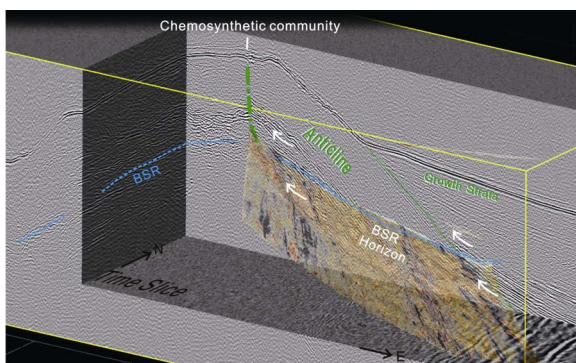
為黑色細菌叢[9]，圖五(f)為管蟲(*Lamellibrachia*)。上述生物 mussel、gastropod、galatheid crab 通常是在熱水噴泉才會出現，但在本研究區域冷泉的發現則指出二者環境上有相同處才導致熱泉生命體系可在冷泉系統發現。

從上述各項影響資料顯示研究區域海床上有大量甲烷正從地層以下向上冒出，滋養大量之化能合成生物群並且產生大量氧化作用而形成大面積之碳酸鈣岩體。另，本研究亦發現文獻上少見之氣體類火焰(flare)群，而在類火焰位置可在水層中發現高達~12000 nL/L 之甲烷(註：正常海水中溶解甲烷< 50 nL/L 甲烷)。而沈積物內亦可發現大量之甲烷、乙烷與丙烷(其中甲烷值可高達~46000μL/L)。更且 C1/C2+ 比值 ratio 已達熱裂解氣源之特徵，顯示此區域之氣體來源並非單純之生物發酵作用。

海床表面存在大面積由於天然氣水合物氣體移棲之特殊生地化特徵，雖然目前因為缺乏 ROV 載具而無法採集測量到生物實際豐度與 AOM 速率，但初步資料顯示天然氣水合物氣體移棲冒氣區須提供大量甲烷氣體才足以支撐如此巨量之化能合成生物族群。氣體移棲需有適當與足夠之管道，三維震測資料即可顯示傳輸之途徑。



圖五 Towcam 在台灣西南海域所拍攝到的海底相片(a)海床有氣體溢出；(b)大量貽貝及鎧甲蝦生長在海床上；(c)軟珊瑚及紅色折尾蝦附著在碳酸岩體上；(d)海床上發現高富集的細菌叢；(e)大塊自生碳酸岩；(f)管蟲富集群落



圖六 P-cable 3D 震測資料及其屬性分析結果示意圖，顯示 BSR 界面氣液移棲路徑

4WC Ridge 三維震測的立體剖面圖（圖六），可看到 4WC Ridge 的背斜乃受到夾擠應力而形成的褶皺變形，其東側的沉積盆地存在著其抬升運動時同步沉積的生長地層。在褶皺的背斜中，可以追溯到連續性的海底仿擬反射層

(Bottom simulating reflector, BSR)訊號切穿過盆地中的地層構造以及背斜脊，並且可由三維空間中觀察到其於頂部以及盆邊緣處的強震幅延伸性（深藍色於 BSR horizon）。最值得注意的是，位於此兩區域的 BSR 上方及下方皆有強震幅的訊號存在(White Arrow)，由於 BSR 為天然氣水合物的相位邊界所在，故其強烈地透露著本區域可能為流氣體聚積的重要區域此外，由背斜脊頂部下方的地層層面錯位，可辨識出其可能為斷層錯動或是破裂面的位置所在。綜合上所述斷層破裂的通道是流氣體移棲至此的管道，故 4WC Ridge 流氣體可以向上移棲至海床表面，故此區可提供取得天然氣水合物樣本的滲漏區域。

四、研究結論

本台德合作研究借助於台灣與德國最先進之海洋科學研究儀器，來探索了解深海資源，原

本應該為毫無生物生長之無陽光無生機之黑暗深海，並用於探索研究區域之生物資源與天然氣水合物能源富集狀況。本研究使用高精密度多頻測深儀取得研究區域海床地形資料，協助佐以高解析之底拖攝影以確實證明區域內氣體冒出區之確實精準位置。進一步再使用 3D P-cable 三維震測儀器探測瞭解氣液移棲之管道。

研究區域內發現在十平方公里內即具有 30-50 個類火焰噴氣結構並正從地層深部向海床傳輸噴氣。大規模之噴出甲烷等氣體支撐著研究區域內之生地化反應，更且正向大氣傳輸大量溫室氣體。海床上因為有氣體噴出故而有範圍之化能合成生物群，其中以 mussel (*bathymodiolus platifron*) 豐度最高，可達 600 隻/m²/層，其中沈積物內甲烷濃度可高達~46000 μL/L，更且具有大量之甲烷、乙烷與丙烷，指出氣體來源為熱裂解。3D P-cable 三維震測可指出氣液移棲之管道，管道提供甲烷等氣體自深部向海床移棲。

研究結果證實台灣西南海域海床不僅具有高豐度之生物族群，更且存在有大量甲烷氣，生物族群下海床具有傳輸管道，此種高度生地化變化作用與天然氣水合物之相關性皆指出海床下具有大量之天然氣水合物。

參考文獻

- [1] K. A. Kvenvolden, *Chem. Geol.*, **71**, 41 (1988).
- [2] C. S. Liu, P. Schnürle, Y. Wang, S. H. Chung, S. C. Chen and T. H. Hsuan, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 615 (2006).
- [3] P. C. Chung, T. F. Yang, S. Lin, H. F. Lee, T. F. Lan, W. L. Hong, C. S. Liu, J. C. Chen and Y. Wang, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 903 (2006).
- [4] T. F. Yang, P. C. Chuang, S. Lin, J. C. Chen, Y. Wang and S. H. Chung, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 933 (2006).
- [5] A. Boetius, K. Ravensschlag, C. Schubert, D. Rickert, F. Widdel, A. Gieseke, R. Amann, B. B. Jorgensen and U. Witte, *Nature*, **407**, 623 (2000).
- [6] S. Lin, W.-C. Hsieh, Y. C. Lim, T. F. Yang, C.-S. Liu and Y. Wang, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 893 (2006).
- [7] Y. C. Lim, S. Lin, T. F. Yang, Y. G. Chen and C. S. Liu, *Jour. Mar. and Petrol. Geol.*, **28**, 1829 (2011).
- [8] C. W. Lin, S. Tsuchida, S. Lin, C. Berndt and T.Y. Chan, *Zootaxa*, **3737**, 92 (2013).
- [9] C. Y. Weng, S. C. Chen, M. C. Lai, S. Y. Wu, S. Lin, T. F. Yang and P. C. Chen, *J. of Sys. and Evol. Microbiol.*, in press, (2015).